

УДК 621.311.25

В. В. Кухарчук, д. т. н., проф.; В. В. Богачук, к. т. н., доц.; В. Ф. Граняк**ВИСОКОЧАСТОТНИЙ МЕТОД І ЦИФРОВИЙ ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ**

Розроблено метод та засіб цифрового вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків на основі зсуву фази вимірювального сигналу відносно опорного. У якості сенсора запропоновано смуговий хвилевід, на поверхні якого розміщено досліджуваний зразок.

Ключові слова: вологість, зсув фази, смуговий несиметричний хвилевід, статична характеристика.

Вступ

Підвищення точності та швидкодії вимірювання вологості готової продукції переробної галузі АПК є одним із перспективних напрямків підвищення її якості [1]. Особливо гостро ця проблема стоїть під час виробництва молокопродуктів, зокрема вершкового масла, експрес-контроль на етапі виробництва якого значно ускладнюється відсутністю первинних вимірювальних перетворювачів, що характеризувалися б достатньо високою швидкістю, точністю та надійністю [2].

Ураховуючи сказане вище, пошук нових способів опосередкованого вимірювання вологості вершкового масла, що мають, як було показано у [2], значно вищу швидкість порівняно з прямими методами, є перспективним напрямком подальших наукових досліджень, а їхнє успішне впровадження – перспективним напрямком модернізації обладнання підприємств цієї галузі.

Постановка завдання

Як випливає з аналізу, наведеного у [2], найперспективнішими з погляду експрес-вимірювання вологості є методи, пов'язані з пропусканням або відбиванням від контрольованого зразка електромагнітного випромінювання, з подальшим вимірюванням зсуву фази та згасання інформаційної хвилі порівняно з опорною. Не менш актуальним є і спрощення конструкції первинного перетворювача, який, маючи зазначені властивості сенсорів на основі електромагнітного випромінювання, був би інваріантним до впливу неінформативних параметрів навколишнього середовища [3]. Оскільки ж під час використання несиметричного смугового хвилеводу зовнішнє навколишнє середовище майже не перекривається інформативною хвилею [4], що забезпечує можливість знехтувати впливом його параметрів, то застосування такої конструкції є перспективним для побудови вимірювальних перетворювачів вологості. Причому, виходячи з конструктивних міркувань, найбільш доцільним є використання у пристрої цієї конструкції в якості інформативної хвилі метрового діапазону, що дозволяє знехтувати впливом власної індуктивності зигзагоподібної системи хвилеводу [5].

З огляду на викладене вище, очевидно є необхідність ґрунтовного дослідження особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання метрового діапазону з водою та вологими речовинами, що дозволить у подальшому використати отримані результати під час побудови сенсора вологості. Тому, виходячи з вищесказаного, проведення експериментальних досліджень впливу вологи на параметри електромагнітного випромінювання діапазону частот 250 – 400 МГц та розробка конструкцій первинного вимірювального перетворювача, який забезпечив би можливість використання особливостей цього впливу для отримання достовірної інформації про вологість контрольованого зразка, є актуальним завданням, результати якого мають науковий і прикладний характер.

Аналіз шляхів розв'язання завдання

Згідно з класичним підходом, лінію передачі із зосередженими параметрами, якою є смуговий хвилевід, використаний під час побудови зазначеного вище сенсора, можна представити у вигляді спрощеного електричного кола, яке зображено на рис. 1 [6].

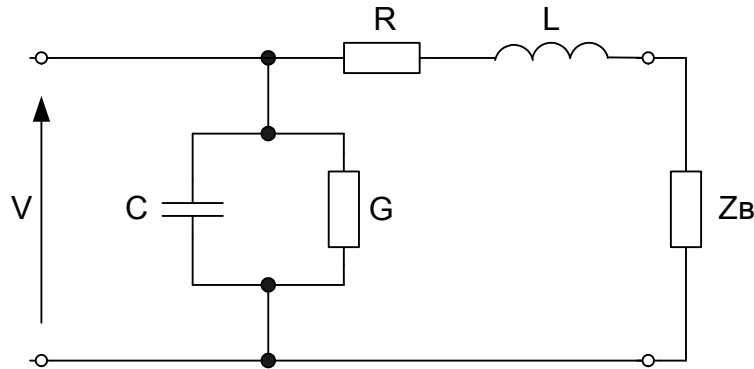


Рис. 1. Електрична схема заміщення хвилеводу

Причому, як показано в роботі [6], величини R та L характеризують втрати та нагромадження енергії в металевому провіднику, а G та C – втрати та нагромадження енергії в матеріалі діелектрика.

Основною особливістю несиметричного смугового хвилеводу є те, що, при правильному виборі його параметрів, у ньому можуть поширюватися лише поперечні магнітні хвилі, структура електромагнітного поля яких дуже схожа на структуру поля поперечної електромагнітної хвилі [4]. А отже, оскільки частина електромагнітного поля буде поширюватися поза межами розміщеного між центральним провідником і заземлювачем діелектрика, то можна зробити висновок, що параметри C та G значною мірою будуть залежними від структури речовини, що розміщена на зовнішній поверхні центрального провідника. Виходячи з цього, оскільки для води характерна наявність відносно високого коефіцієнту заломлення, логічно буде припустити, що фазні параметри такої хвилі будуть значною мірою залежними від вологості зразка, розміщеного на поверхні такого хвилеводу.

У такому випадку зсув фази вихідної хвилі з доволі високою точністю можна визначити, виходячи зі співвідношення [6]:

$$\Delta\varphi = \omega(LC)^{1/2} \Delta x, \quad (1)$$

де ω – кутова частота хвилі, що поширюється у хвилеводі; Δx – довжина хвилеводу.

Аналізуючи вираз (1), можна зробити висновок, що величини ω , L та Δx для розглянутого випадку є сталими, а отже, цей вираз по суті є функцією типу $\Delta\varphi = f(C)$.

Для підтвердження гіпотези про значний вплив вологості зразка на параметри електромагнітної хвилі запропоновано експериментальну установку, структурну схему якої приведено на рис. 2.

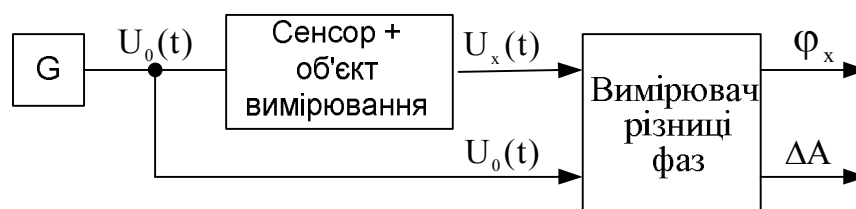


Рис. 2. Структурна схема експериментальної установки

Вимірювальний перетворювач є несиметричним смуговим хвилеводом, геометричні

розміри якого вказано на рис. 3. Як матеріал діелектричної пластини було використано склотекстоліт (електромагнітна проникність $\varepsilon = 5$, товщина склотекстоліту $h = 2$ мм).

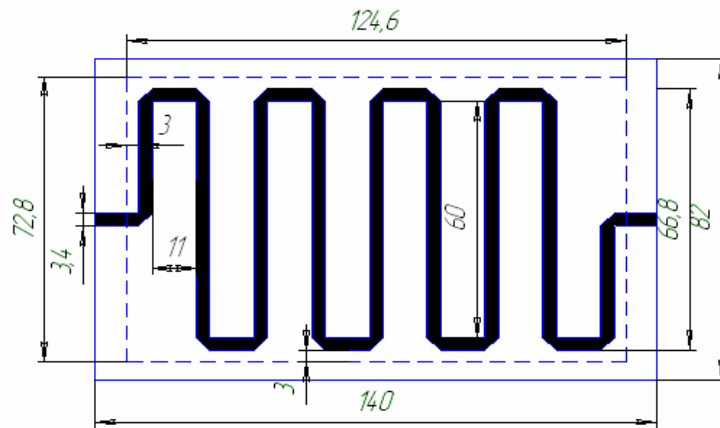


Рис. 3. Схема хвильоводу

Відповідно, сумарний опір хвильоводу за (1) [4] становить:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \frac{L}{h} \cdot \left(1 + \frac{1,735}{\varepsilon^{0,0724} \left(\frac{L}{h}\right)^{0,836}}\right)} = 50 \text{ (Ом)}, \quad (2)$$

де L – ширина хвильоводу (3,4 мм).

Під час дослідження інтенсивності згасання та зсуву фази було використано: вимірювач різниці фаз «ФК2 – 12» і генератор сигналів високочастотний «Г4 – 107» (вихідна напруга генератора була зафіксована на рівні $U_0(t) = 0,7$ (В)).

Експеримент виконано у два етапи в діапазоні зміни частоти електромагнітних хвиль 250 – 400 МГц.

На першому етапі отримано характеристики згасання та зміщення фази для зразків з вологістю 100% та 50% (50% – дистильована вода, 50% – гліцерин) і товщиною зразка 10 мм. У результаті дослідження отримано такі результати, приведені на рис. 4 та рис. 5.

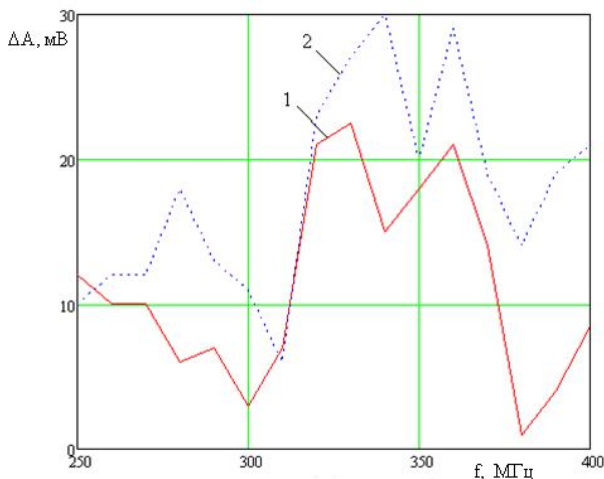


Рис. 4. Залежність інтенсивності згасання електромагнітної хвилі від частоти:

- 1 – зразок з 100% вологості;
2 – зразок з 50% вологості (50% – дистильована вода, 50% – гліцерин)

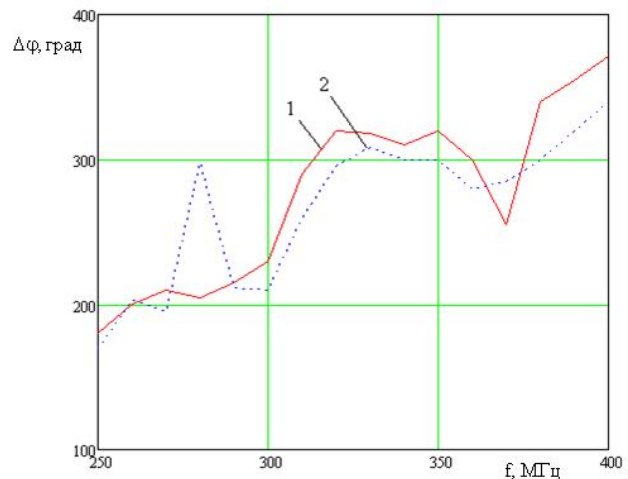


Рис. 5. Залежність зсуву фази електромагнітної хвилі від частоти:

- 1 – зразок з 100% вологості;
2 – зразок з 50% вологості (50% – дистильована вода, 50% – гліцерин)

На другому етапі отримано характеристики згасання та зсуву фази для зразків із $\approx 0\%$

(висушене вершкове масло), 16,04%, 19,66%, 24,86%, 26,92% вологості. Товщина шару кожного зі зразків становила 10 мм. У результаті дослідження були отримані результати, що зведені на рис. 6 та рис. 7.

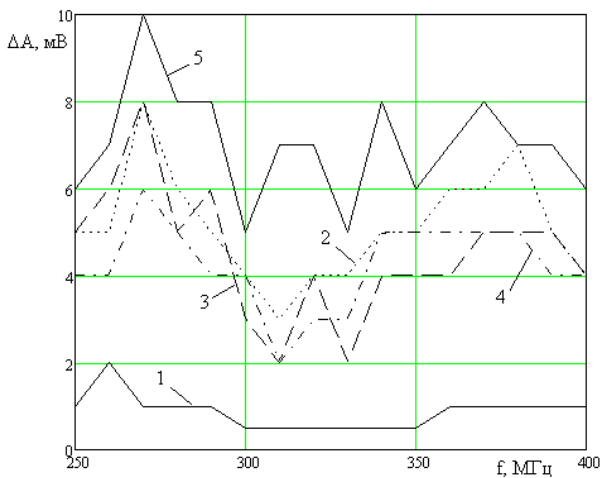


Рис. 6. Залежність інтенсивності затухання електромагнітної хвилі від частоти:

- 1 – зразка з 0% вологості;
- 2 – зразка зі 16,04% вологості;
- 3 – зразка з 19,66% вологості;
- 4 – зразка з 24,82% вологості;
- 5 – зразка з 26,92% вологості

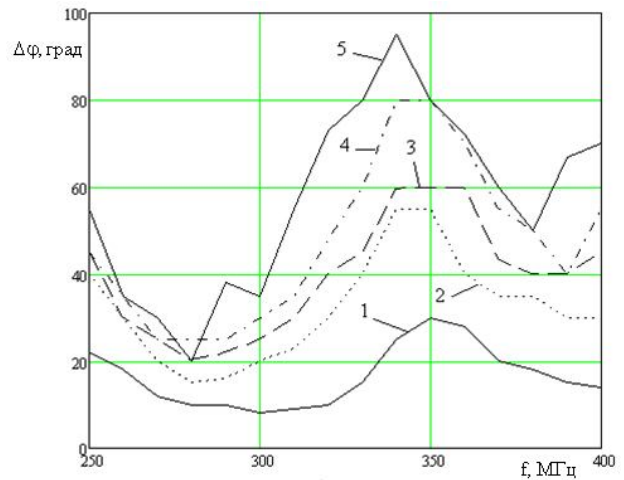


Рис. 7. Залежність зміщення фази електромагнітної хвилі від частоти:

- 1 – зразка з 0% вологості;
- 2 – зразка зі 16,04% вологості;
- 3 – зразка з 19,66% вологості;
- 4 – зразка з 24,82% вологості;
- 5 – зразка з 26,92% вологості

З отриманих вище експериментальних даних, як і очікувалося, впливає, що використання фазних зміщень забезпечує можливість побудови вимірювального перетворювача, проте використання параметра затухання хвилі через низьку чутливість є недоцільним.

З аналізу даних, отриманих під час вимірювання зсуву фази для зразків з різною вологістю (рис. 6), можна відзначити також яскраво виражену нелінійність функції перетворення сенсора. Оскільки висока чутливість спостерігається не для всіх досліджуваних частот, то найперспективнішими для побудови сенсора вологості є частоти 290, 300, 310, 320, 330 та 340 МГц.

Під час апроксимації отриманих даних за методом найменших квадратів поліномами першого ($y = a[0] + a[1] \cdot x$) та другого ($y = a[0] + a[1] \cdot x + a[2] \cdot x^2$) порядку для зазначених частот отримано такі результати, зведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати апроксимації експериментальних даних

Частота інформативної хвилі, МГц	Поліном 1-го порядку	Сума квадратів відхилень поліному 1-го порядку	Поліном 2-го порядку	Сума квадратів відхилень поліному 2-го порядку
290	$a[0] = 7,167$ $a[1] = 0,86$	108,29	$a[0] = 10,128$ $a[1] = -0,489$ $a[2] = 0,052$	38,54
300	$a[0] = 6,874$ $a[1] = 0,956$	12,67	$a[0] = 8,011$ $a[1] = 0,439$ $a[2] = 0,02$	2,39

Продовження табл. 1

Частота інформативної хвилі, МГц	Поліном 1-го порядку	Сума квадратів відхилень поліному 1-го порядку	Поліном 2-го порядку	Сума квадратів відхилень поліному 2-го порядку
310	$a[0] = 5,443$ $a[1] = 1,427$	211,82	$a[0] = 9,273$ $a[1] = -0,317$ $a[2] = 0,067$	95,17
320	$a[0] = 5,289$ $a[1] = 1,996$	338,13	$a[0] = 10,318$ $a[1] = -0,294$ $a[2] = 0,088$	137,02
330	$a[0] = 10,672$ $a[1] = 2,135$	255,3	$a[0] = 15,386$ $a[1] = -0,012$ $a[2] = 0,083$	78,54
340	$a[0] = 20,906$ $a[1] = 2,407$	191,7	$a[0] = 25,31$ $a[1] = 0,402$ $a[2] = 0,077$	37,47

Статичні характеристики перетворювача для кожної з указаних частот приведено на рис. 8 і рис. 9.

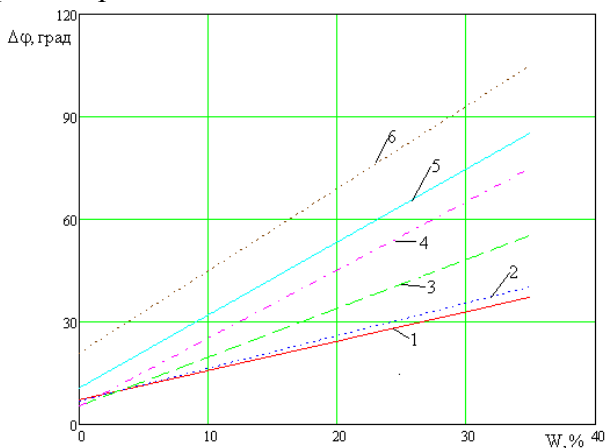


Рис. 8. Статичні характеристики сенсора під час апроксимації результатів поліномом 2-го порядку:

- 1 – для частоти інформативної хвилі 290 МГц;
- 2 – для частоти інформативної хвилі 300 МГц;
- 3 – для частоти інформативної хвилі 310 МГц;
- 4 – для частоти інформативної хвилі 320 МГц;
- 5 – для частоти інформативної хвилі 330 МГц;
- 6 – для частоти інформативної хвилі 340 МГц

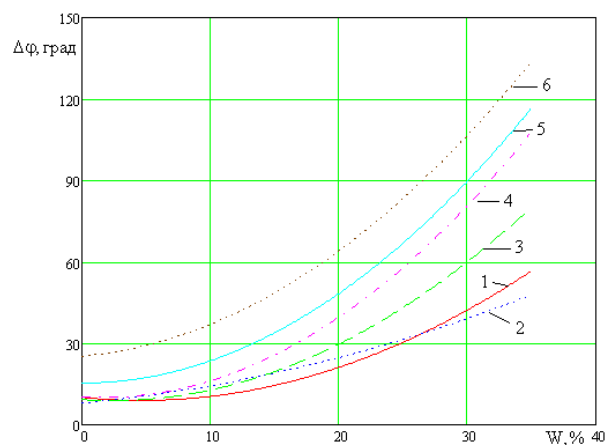


Рис. 9. Статичні характеристики сенсора під час апроксимації результатів поліномом 3-го порядку:

- 1 – для частоти інформативної хвилі 290 МГц;
- 2 – для частоти інформативної хвилі 300 МГц;
- 3 – для частоти інформативної хвилі 310 МГц;
- 4 – для частоти інформативної хвилі 320 МГц;
- 5 – для частоти інформативної хвилі 330 МГц;
- 6 – для частоти інформативної хвилі 340 МГц

Відповідно, аналізуючи отримані суми квадратів відхилення можна зробити висновок, що найперспективнішою на вказаному діапазоні є частота хвилі 300 МГц. Проте значним недоліком її використання є неможливість вимірювання зміщення фази, використовуючи стандартний цифровий канал різниці фаз, що зумовлено виходом цієї частоти, а тим більше частоти сигналу квантування за верхню межу пропускання наявних цифрових схем.

Виходячи з цього, доцільним є застосування спеціальних високочастотних цифрових каналів, які забезпечують можливість вимірювання різниці фаз хвиль метрового діапазону з досить високою точністю. У результаті поєднання такого каналу з розробленим сенсором, час вимірювання наближено дорівнює подвійній тривалості періоду вхідної хвилі, а похибка на частоті вхідної хвилі від 5 до $5 \cdot 10^8$ Гц не перевищує:

$$\Delta \leq (0,1 + 10^{-7} f)^0, \quad (3)$$

де f – частота вхідної хвилі.

На основі вищенаведеного було розроблено смуговий вимірювач вологості, структурну схему якого приведено на рис. 10.

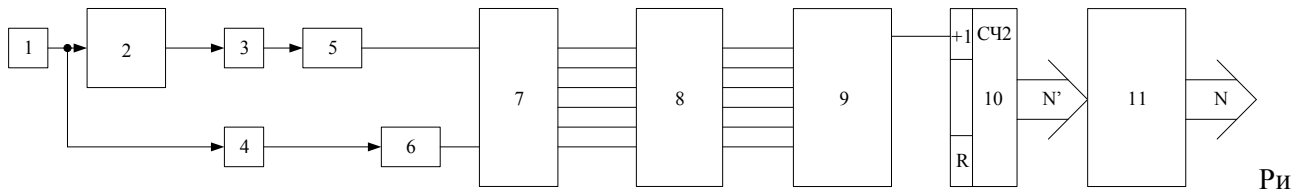


Рис. 10. Структурна схема смугового вимірювача вологості

Цей засіб містить: 1 – генератор електромагнітних хвиль частотою 300 МГц, вихід якого з'єднаний з входом первинного вимірювального перетворювача 2 та другим формувачем 4; 2 – описаний вище сенсор, вихід якого з'єднаний з входом першого формувача 3; 3, 4 – відповідно перший та другий формувачі, виходи яких з'єднані з входами першого 5 та другого 6 імпульсних фільтрів відповідно; 5, 6 – перший та другий імпульсні фільтри, виходи яких з'єднані з першим та другим входом формувача фазових інтервалів 7; 7 – формувач фазових інтервалів, виходи якого під'єднанні до входів блоку квантування 8; 8 – блок квантування, виходи якого з'єднані з входами елемента динамічного додавання 9; 9 – елемент динамічного додавання, вихід якого під'єднаний до входу двійкового лічильника 10; 10 – двійковий лічильник, виходи якого з'єднані з входами числового перетворювача 11; 11 – числовий перетворювач.

Принцип роботи смугового вимірювача вологості побудовано на тому, що з генератора 1 на вхід первинного вимірювального перетворювача 2 та другого формувача 4 подається сигнал частотою 300 МГц. Проходячи через вимірювальний перетворювач 2, інформативний параметр $U_1(t)$ залежно від вологості зсувається за фазою відносно опорного сигналу $U_0(t)$ на різницю фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1 = a_1 + a_2 \cdot W + a_3 \cdot W^2,$$

де W – вологість зразка; φ_1 – фаза інформаційної хвилі; φ_0 – фаза опорної хвилі; a_1, a_2, a_3 – постійні коефіцієнти.

З виходу 2 сигнал подається на вхід першого формувача 3. На виході 3 і 4 формуються прямокутні імпульси, фронт і зріз яких прив'язані до нуль-переходів вхідних сигналів.

З виходів формувачів 3 та 4 сигнали надходять на перший 5 та другий 6 імпульсні фільтри, за допомогою яких здійснюється вилучення похибки, спричиненої переходом через нуль-рівень напруги сигналу на вході формувача в момент часу, що відповідає нуль-переходам вхідного сигналу. Причиною появи цього складника похибки є наявність широкосмугового шуму у вхідному сигналі та генерація додаткового широкосмугового шуму у вхідних каскадах формувачів.

З виходу імпульсних фільтрів 5 та 6 відфільтровані сигнали надходять на входи формувача фазових інтервалів 7, призначеного для формування чотирьох фазових інтервалів, що являють собою імпульси додатної полярності, скважність яких пропорційна вимірюваному фазному зсуву, а частота – дорівнює половині частоти вхідного сигналу.

Окрім цього, у 7 формуються два інтервали корекції, що являють собою імпульси додатної полярності, тривалість яких пропорційна часу затримки сигналів у 5 та 6, а частота – дорівнює подвоєній частоті сигналу.

Із виходів 7 чотири фазових інтервали та два інтервали корекції подають на вхід блоку

квантування 8, де заповнюються квантуючими імпульсами, тобто формується шість імпульсних послідовностей і коригувальних інтервалів.

Загальна кількість імпульсів усіх послідовностей, що надходять на входи елемента динамічного додавання 9 за цикл вимірювання, є пропорційною фазовому зсуву між інформативним та опорним сигналом, тобто описується такими рівняннями перетворення: $N = S_{\varphi} \cdot \Delta\varphi$.

В елементі динамічного додавання 9 здійснюється об'єднання шести імпульсних послідовностей фазових і коригувальних інтервалів в одну імпульсну послідовність зі збереженням загальної кількості імпульсів.

Із виходу елемента динамічного додавання 9 сигнал подається на двійковий лічильник 10, де здійснюється їхній послідовний підрахунок за один цикл вимірювання. Після чого отриманий двійковий код із виходу лічильника 10 надходить на вхід числового перетворювача 11, де за рівнянням перетворення $N = S_{\varphi} \cdot (a_1 + a_2 \cdot W + a_3 \cdot W^2)$ отримуємо вимірне значення вологості.

Висновки

1. Експериментально встановлено, що побудова вимірювальних перетворювачів у частотному діапазоні 250 – 400 МГц можлива лише на основі перетворення вологості в різницю фаз, тому що перетворення вологості в напругу характеризується неприпустимо низькою чутливістю для її практичної реалізації.

2. Показано, що залежність різниці фаз від вологості має монотонно зростаючий нелінійний характер.

3. Доведено, що для побудови первинного вимірювального перетворювача необхідно вибирати частоту інформаційної хвилі 300 МГц, оскільки на цій частоті спостерігається не лише монотонне зростання різниці фаз при зростанні вологості зразка, але й має місце мінімальна сума квадратів відхилень експериментальних значень від визначеного за методом найменших квадратів поліному другого порядку.

4. Як один із прикладів практичної реалізації засобу вимірювання вологості, в основу якого покладено метод перетворення вологості в різницю фаз електромагнітної хвилі, запропоновано цифровий смуговий вимірювач.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Берлинер М. А. Измерение влажности. Изд. 2-е, переработанное и дополненное / М. А. Берлинер. – М.: Энергия, 1973. – 420 с.
2. Кухарчук В. В. Аналіз методів неруйнівного контролю гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, І. К. Говор, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2009. – № 5. – С. 7 – 14.
3. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю порошкоподібних матеріалів. Монографія / В. В. Богачук, Б. І. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 141 с.
4. Изюмова Т. И. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии / Т. И. Изюмова, В. Т. Свиридов – М.: Энергия, 1975. – 112 с.
5. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. В 5 т. Т. VI. / Д. В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2005. – 795 с.
6. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. Перевод с английского / В. Фуско. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

Кухарчук Василь Васильович – завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань.

Богачук Володимир Васильович – доцент кафедри відновлювальної енергетики та електричних транспортних систем і комплексів.

Граняк Валерій Федорович – магістрант першого року навчання інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет.